39. Cooperative formation of memory function in a nonlinear optical system

大塚, 建樹; 池田, 研介

39. Cooperative formation of memory function in a nonlinear optical system

NTT基礎研究所　大塚建樹
京大基研　池田研介

従来まで，非線形光学素子の研究は個々のエレメント例えば，レーザや光双安定素子に限られてきた。もちろん，これらの素子を集積化することによって様々な理論動作を行う機能をもたせる研究も盛んに行われている。しかし，集積化によってもたせることができる計算機能の設計思想は従来半導体デバイスで行われてきた考え方をそのまま光に拡張したに過ぎない。光学系における実用上の問題点は，集積化を行った後で，個々のエレメントの論理動作を可能ならしめるために必要なほど大きな非線形過程を用いるとスイッチング速度が著しく低下してしまう点にある。従って，計算速度という観点からすると集積化光デバイスは半導体論理デバイスの後塵を拝さざるをえない。他方，基本的なエレメントからなる『集合体』は，適当な結合の導入によって，自動的に並列処理機能を発現し，相当に INTELLIGENT な動作を示すことが最近注目されている。例えば，神経ネットワーク[1] やその OPTICAL ANALOGUE としてのホログラフィを用いたシステム[2]は連想記憶の機能を示すことができる。もし光素子を用いて同様な INTELLIGENT な動作を並列処理的に行うことができるならば，光デバイスの情報処理時間の遅さは充分カバーできるであろう。このように実用上の観点からみても，レーザや光双安定系といった個々のエレメントが適当に結合することによって発揮しうる機能を研究することは極めて今後重要な問題となってくるだろう。

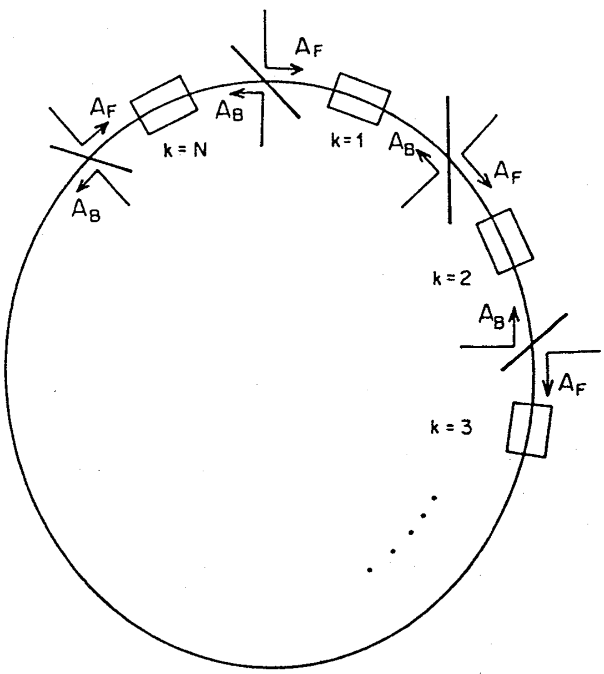

図1　非線形媒質集合素子のモデル

ここでは，光学系として実現できる非線形光学素子の集合体を提案する。この系は，図1に示すように鏡によってはさまれた非線形誘電媒質をエレメントとす

るシステムである。そして個々のエレメントは光ビームによって隣接するエレメントと結合している。光ビームによる結合が存在しない場合，各エレメントは何らの機能動作も示さない。ところが，光ビームで結合されたエレメント結合系は全体として，個々のエレメントでは考えられない極めて興味深い，動的あるいは静的機能を発現することができる。

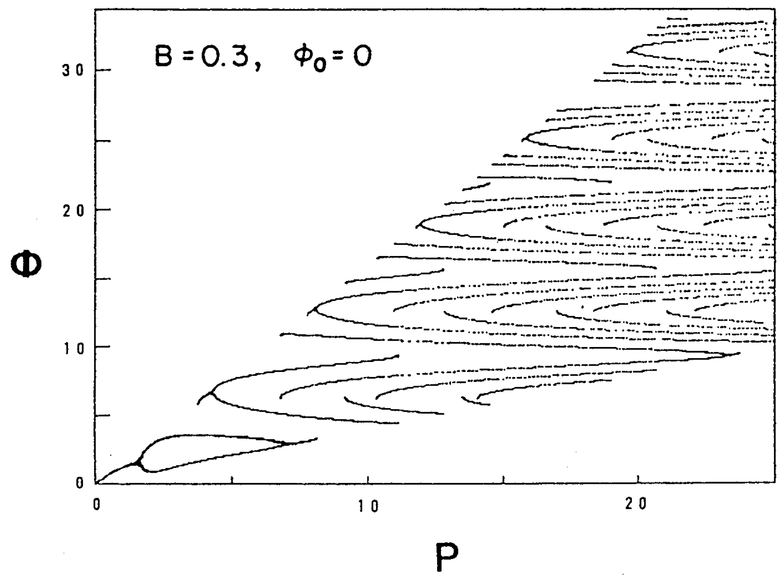

図2　安定な2周期空間構造の分岐図
B＝0.3，$\phi_0 = 0$
（1周期構造も併記）

本論文では，単一のエレメントでは記憶能力のない非線形誘電媒質を図1のように，双方向から入射した光ビームにより互いに結合させることにより，集合体として協働的に記憶機能を発現できることを示す。記憶は系に発生した安定な空間カオスによってになわれる。

図1の集合体の各エレメントでの位相変化は，B（結合）≪1，$A^2 B \sim O(1)$の条件で

$$\tau \dot{\phi}_k = -\phi_k + f_F(\phi_{k-1}) + f_B(\phi_{k+1}), \quad \phi_{N+1} = \phi_1$$

$$f_{F \text{ or } B}(\phi) = A_{F \text{ or } B}{}^2 (1 + 2B\cos(\phi + \phi_0)), \quad k = 1, 2, \cdots N$$

に従う。ここで，Aは各エレメントへの入力電界，τは媒質の応答時間，ϕ_0は初期離調である。

入射光が一方向（$f_B(\phi) = 0$）の場合，解は写像 $\phi_n = f_F(\phi_{n-1})$ で決定され，空間リアプノフ数が負の解のみが時間的に安定化される。従って安定解が存在するパラメタ領域はwindowの存在領域に限られ，しかもその数も極めて少い。ところが双方向入射の条件の下では事情が劇的に変化し，むしろ空間リアプノフ数正（空間的に〝不安定〃）の（あるクラスの）解が時間的に安定に存在するのである。従って，非常に広いパラメータ領域で空間カオス解が安定に存在し，大雑把に言って単位エレメント当りトポロジカルエントロピーに相当する量の記憶容量が発生することが期待される。

より詳細な研究の結果は以下の通りである。結合が増大すると，空間解の分岐がおこり２周期解（ 1,0 でコードすると 1,0,1,0 ……のパタン）への安定な分岐がまづおこる。ところが安定２周期解はただ一種ではなく図２の分岐ダイヤグラムに示すように $P=A_F^2+A_B^2$ =入力パワーの増大と共にその数が急激に増大する。この２周期解は空間的に不安定で，その近傍にヘテロクリニックカオスに対応する空間構造が時間的に安定な構造として存在する[3]。ヘテロカオスがふくむ多様な構造に情報を記憶させることが可能である。この空間構造は，２周期構造を骨格に持ち，ヘテロクリニック軌道に対応した〝キンク〟が埋め込まれたパターンである。図３にヘテロクリニック空間カオスの構造とその空間リターンマップの一例を示す。

このキンクは入射光 A_F（ A_B 或いは両方）や初期離調 ϕ_0 を空間的に変調し緩和先を指定することにより，入射パターンに対応した位置に形成することが可能である。また，入射パターンをパルス的に与えた場合，光遮断後でもキンク構造が安定に記憶される。更に，各エレメントに一様な刺激パルスを印加することによってキンクを消滅させたり，繰り返し異なるパターンを逐次記憶することもでき，並列的な記憶素子として動作させることができる。図４に $N=8$ でのパルス的パターン入力の書き換え記憶のシュミレーション結果を示す。

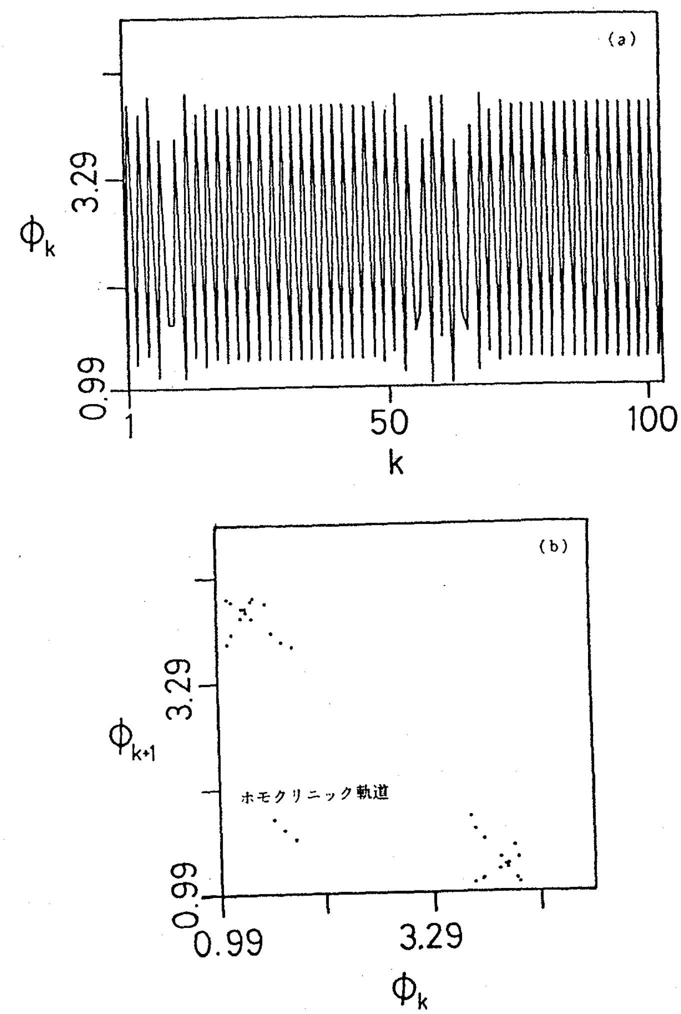

図３　ホモクリニック空間カオス
(a)　空間構造
(b)　空間リターンマップ

この新しい機構による記憶で得られる容量は，如何に稠密にキンクを形成できるかに掛かっている。計算機実験の結果，$N\gg 1$ の場合，少なくとも〔1, 0, 0, 1, 0〕と〔1, 0〕のランダムな組合せパターンに対応する空間カオス構造が形成されることが判明した。この時の記憶容量は，１エレメント当たり 2/7 ビットとなる。

記憶された空間カオスパターンの一例を図5に示す。

本系では，同一の周期2解を結ぶヘテロクリニック構造以外に，異なる2周期解を結ぶヘテロクリニックな構造も存在し，望む空間構造間の遷移も可能である。これらの構造を含めると，潜在的な記憶容量は相当増大することが予想される。

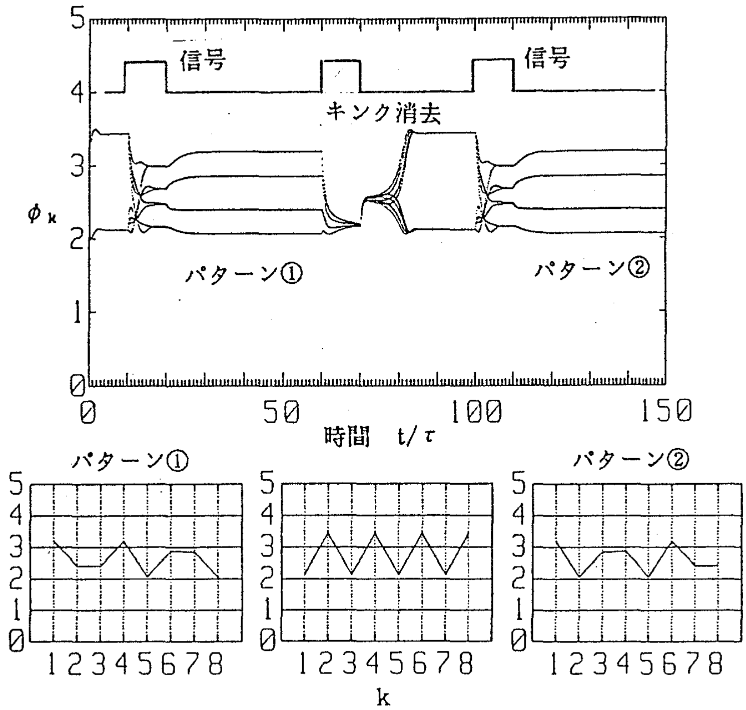

図4 入力パターンのキンク構造への書き換え記憶
$N=8$， $P=5$， $B=0.3$， $\phi_0=0$

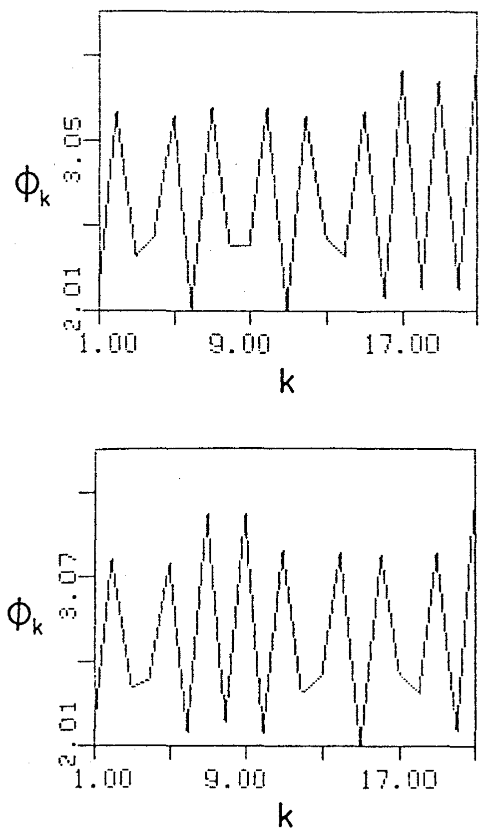

図5 記憶されたキンク構造の一例
$N=21$， $P=5$， $B=0.3$，
$\phi_0=0$

文　献

1) J. J. Hopfield : Proc. Natl. Acad. Sci. USA (1982) 1982.
2) Y. Owechko et al. : SPIE 700 - 1986 International Optical Computing Conf. (1986) 126.
3) K. Otsuka and K. Ikeda : Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 194.